

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт геологии и нефтегазовых технологий

Кафедра геологии нефти и газа

Н.Г. НУРГАЛИЕВА

**РЕКОНСТРУКТИВНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ОСАДОЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ**

Учебное пособие
для студентов и аспирантов, обучающихся
по направлениям 05.03.01, 05.04.01, «Геология», 05.06.01 – «Науки о Земле»

КАЗАНЬ – 2017

*Печатается по решению учебно-методической комиссии
Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ
Протокол № 3 от 25 января 2017 г.*

Составитель
Н.Г. Нургалиева

Рецензенты:
зав. кафедрой геологии нефти и газа, профессор,
д.г.-м.н. Б.В. Успенский;
зав. кафедрой геофизики и геоинформационных
технологий, к.г.-м.н. Д.И. Хасанов

Реконструктивное значение геохимических данных при изучении осадочных образований: учебное пособие для студентов и аспирантов, обучающихся по направлениям 05.03.01, 05.04.01 «Геология», 05.06.01 - Науки о Земле по курсам «Секвенс-стратиграфия», «Анализ бассейнов осадконакопления», «Основы формационного анализа нефтегазоносных толщ», «Основы секвенс- и изотопной стратиграфии», «Изотопно-геохимические методы исследования горных пород» / Н.Г. Нургалиева. – Казань: Казан. ун-т. – 2017. – 39 с.

Предназначено для теоретического и практического освоения способов изучения строения и генезиса осадочных комплексов.

© Нургалиева Н.Г., 2017 г.
© Казанский университет, 2017 г.

Оглавление

Введение	4
Реконструктивное значение геохимических данных по выбранной коллекции песчаников, глин и известняков.....	5
Песчаники.....	5
Глинистые отложения.....	24
Известняки.....	33
Список рекомендуемой литературы	37

Введение

Настоящее пособие предлагает знакомство со способами выявления реконструктивного содержания геохимических данных на примере нижнеюрских осадочных отложений в одной из областей Юго-Западной Азии на стыке Ближнего и Среднего Востока, приуроченном к территории Киммерийского орогенеза. Выясняются такие реконструктивные аспекты, как состав, выветривание, зрелость компонентов, климатические условия и тектоническое положение питающей провинции.

Минералогический и химический состав обломочных осадочных пород контролируется различными факторами, включая состав пород питающей провинции, процессы и условия (атмосферные осадки, топография, химия, температура) выветривания пород питающей провинции, длительность выветривания пород питающей провинции, механизмы транспортировки кластического материала из областей сноса к депоцентрам, обстановки осадконакопления (например, морские или пресноводные) и постседиментационные процессы (от диагенеза до метагенеза).

Все эти вопросы рассматриваются в обширной научной литературе.

Среди терригенных осадочных пород аргиллиты (глины, сланцы) известны как объекты, представляющие средний коровый состав питающей провинции в большей степени, чем другие кремнекластовые образования.

Глинистые породы содержат большинство минеральных компонентов источников сноса и имеют химический состав, близко отражающий состав пород питающей провинции и условия палеовыветривания [Pettijohn, 1975].

В качестве обучающей модели были адаптированы данные и построения из (http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/15928/12/12_chapter%203.pdf).

Тринадцать образцов песчаников, четыре образца глинистых пород и четыре образца известняков отобраны из обнажений. Основные элементы определялись с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), второстепенные элементы с помощью метода плазменной масс-спектрометрии

ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). Аналитическая погрешность составила менее 5% для обеих групп элементов.

Следует отметить, что все статистические выводы носят условный характер (выборки образцов малы в учебных целях) для более быстрой адаптации к пониманию способов обработки геохимических данных и их последующей интерпретации.

Реконструктивное значение геохимических данных по выбранной коллекции песчаников, глин и известняков

ПЕСЧАНИКИ

Геохимия песчаников

Концентрации макро- и микроэлементов по тринадцати образцам песчаников показаны в таблице 1. Также приведены различные отношения основных элементов.

В анализируемых образцах концентрации основных элементов варьируются в узких интервалах. Песчаники содержат 74.31-77.32 wt.% SiO_2 (здесь и далее wt.% - вес.%); 7.87 -10.08 wt.% Al_2O_3 ; 0.28 - 0.35 wt.% TiO_2 ; 3.66 - 5.52 wt.% Fe_2O_3 ; 0.05 to 0.08 wt.% MnO ; 2.43 - 2.89 wt.% CaO ; 0.53 - 1.18 wt.% MgO ; 0.34 -1.26 wt.% Na_2O ; 1.48 - 1.92 wt.% K_2O and 0.10 - 0.16 wt.% P_2O_5 . Общее железо выражено в виде Fe_2O_3 . Из микроэлементов содержание Co варьирует от 4.88 до 9.55 ppm; Ni – от 10 до 22 ppm; Cu – от 12 до 28 ppm; Zn – от 18 до 46 ppm; и Cr – от 58 до 74 ppm.

Песчаники классифицируются по своему химическому составу по-разному (например, см. [PettiJohn, 1975; Crook, 1974; Herron, 1988]).

В настоящем пособии предлагается использовать классификацию Херрона [Herron, 1988], которая представляет собой диаграмму $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ -

$\log (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$. На этой диаграмме исследуемые песчаники относятся к области литаренитов (рис.1).

Таблица 1.

Элементы	№ образцов						
	1П	2П	3П	4П	5П	6П	7П
SiO_2 , wt. %	74.61	75.08	74.31	76.33	75.63	75.45	74.64
Al_2O_3 , wt. %	9.97	9.43	10.08	8.98	9.25	9.38	9.93
TiO_2 , wt. %	0.35	0.32	0.35	0.3	0.32	0.32	0.35
Fe_2O_3 , wt. %	5.37	4.87	5.32	3.95	4.61	4.62	5.37
MnO , wt. %	0.07	0.07	0.06	0.05	0.07	0.07	0.07
CaO , wt. %	2.83	2.79	2.89	2.6	2.7	2.74	2.83
MgO , wt. %	0.82	0.61	1.18	0.92	0.84	0.53	0.78
Na_2O , wt. %	0.81	0.74	0.56	0.61	0.34	0.83	1.26
K_2O , wt. %	1.88	1.74	1.92	1.57	1.65	1.67	1.87
P_2O_5 , wt. %	0.15	0.14	0.16	0.11	0.13	0.14	0.15
SO_3 , wt. %	0.07	0.13	0.08	0.12	0.06	0.09	0.07
ППП, wt. %	3.01	3.91	2.73	3.96	3.97	3.85	2.59
Сумма, wt. %	99.94	99.83	99.84	99.5	99.57	99.69	99.91
Co, ppm	7.84	9.26	5.47	7.59	4.89	6.26	6.31
Ni, ppm	12	12	11	15	11	10	13
Cu, ppm	12	14	26	23	19	23	20
Zn, ppm	34	18	31	46	45	23	32
Cr, ppm	66	73	69	74	69	64	65
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$	28.48	29.47	28.8	29.93	28.9	29.31	28.37
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	7.48	7.96	7.37	8.5	8.18	8.04	7.51
$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$	213.1	234.6	212.3	254.4	236.3	235.8	213.2
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	2.32	2.35	3.43	2.57	4.85	2.01	1.48
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$	5.3	5.42	5.25	5.72	5.6	5.61	5.94
Cr/Ni	5.5	6.08	6.27	4.93	6.27	6.4	5
CIA, %	53.93	53.56	54.97	54.71	56.03	53.49	51.79
PIA, %	74.95	75.66	81.34	78.46	87.12	73.75	65.62
CIW, %	78.98	79.95	84.58	81.78	89.34	77.55	70.55
CIW', %	88.25	88.59	91.65	89.97	94.37	87.35	82.73

Продолжение таблицы 1.

Элементы	№ образцов						Среднее по 13 образцам
	8П	9П	10П	11П	12П	13П	
SiO ₂ ,wt. %	75.29	74.53	75.82	77.32	75.91	74.55	75.34
Al ₂ O ₃ ,wt. %	9.4	9.97	9.13	7.87	9.08	9.97	9.42
TiO ₂ ,wt. %	0.32	0.35	0.32	0.28	0.32	0.35	0.33
Fe ₂ O ₃ ,wt. %	4.73	5.42	4.41	3.66	4.39	5.41	4.78
MnO,wt. %	0.07	0.08	0.07	0.05	0.05	0.08	0.07
CaO,wt. %	2.74	2.82	2.68	2.43	2.68	2.84	2.74
MgO,wt. %	1.21	0.71	1.05	1.05	1.12	0.95	0.91
Na ₂ O,wt. %	0.49	1.12	0.95	0.7	0.6	0.4	0.72
K ₂ O,wt. %	1.64	1.89	1.62	1.48	1.6	1.9	1.73
P ₂ O ₅ ,wt. %	0.13	0.15	0.13	0.1	0.11	0.15	0.13
SO ₃ ,wt. %	0.11	0.12	0.09	0.07	0.06	0.06	0.09
ППП,wt. %	3.68	2.71	3.52	4.59	3.79	3.12	3.49
Сумма,wt. %	99.81	99.87	99.79	99.6	99.71	99.78	99.76
Co, ppm	8.44	5.21	6.84	4.88	7.35	9.55	6.91
Ni, ppm	16	15	17	12	22	14	13.85
Cu, ppm	18	25	19	17	22	28	20.46
Zn, ppm	28	29	34	46	32	38	33.54
Cr, ppm	58	64	69	71	72	73	68.23
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	29.37	28.48	28.53	28.11	28.37	28.48	28.82
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	8	7.47	8.3	9.82	8.36	7.47	8.04
SiO ₂ /TiO ₂	235.3	212.9	236.9	276.1	237.2	213	231.62
K ₂ O/Na ₂ O	3.35	1.69	1.7	2.11	2.66	4.75	2.71
Al ₂ O ₃ /K ₂ O	5.73	5.27	5.63	5.31	5.67	5.24	5.51
Cr/Ni	3.62	4.05	4.05	5.91	3.27	5.21	5.12
CIA, %	55.4	52.5	52.71	52.31	54.46	55.85	53.98
PIA, %	82.54	68.33	70.29	73.26	78.97	85.84	76.63
CIW, %	85.35	73.07	74.52	77.48	82.25	88.41	80.29
CIW', %	92.1	84.44	85.4	87.31	90.26	93.85	88.94

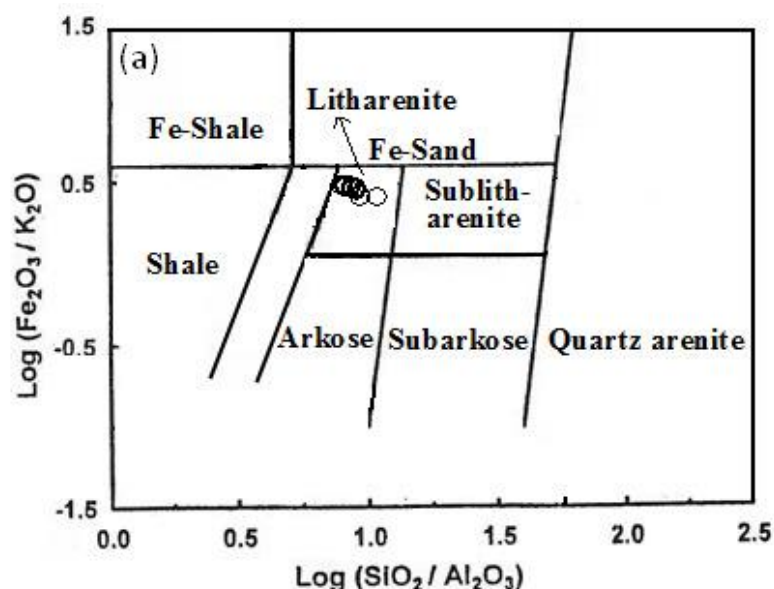


Рис.1. Положение песчаников в классификации Херрона.

По классификации Кроока [Crook, 1974] песчаники подразделяются на три типа (песчаники богатые кварцем, промежуточная группа и песчаники, бедные кварцем). Классификация основана на содержаниях Na_2O и K_2O и используется с помощью диаграммы $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$. На этой диаграмме исследуемые песчаники относятся к области отложений, богатых кварцем (рис.2).

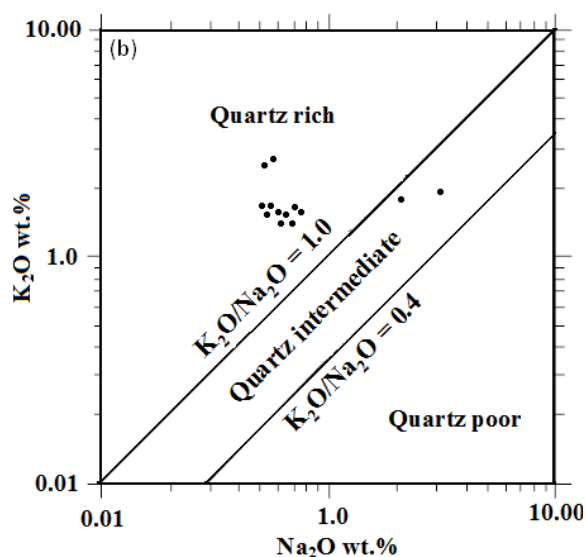


Рис.2.

Однако изучаемые песчаники характеризуются меньшими содержаниями SiO_2 (среднее содержание SiO_2 : 75.34 wt.%) по сравнению с типичными богатыми кварцем песчаниками, где среднее содержание кварца составляет 89 wt.%.

Состав не кварцевой компоненты песчаников может быть оценен по значениям определенного модуля – так называемого индекса композиционной вариации - Index of Compositional Variation (ICV) по [Cox et al., 1995]:

$$\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) / \text{TiO}_2.$$

Значения этого индекса в изучаемых песчаниках изменяются от 1.10 до 1.23 (среднее значение 1.18). Значения ICV больше, чем 1, указывают на присутствие в меньшей степени глинистых минералов и в большей степени таких породообразующих минералов как плагиоклаз, калиевый полевой шпат, амфиболы, пироксены, а также обломков пород.

Известно, что значения отношения содержаний $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в глинах составляют менее 0.3, а в полевошпатовых компонентах изменяются от 0.3 до 0.9. Значения отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в изучаемых песчаниках изменяются от 0.17 до 0.19 (среднее значение отношения составляет 0.18). Эти значения указывают на доминирование глинистых минералов над калиевыми полевыми шпатами и слюдами.

Среди основных элементов в исследуемой выборке SiO_2 характеризуется отрицательной корреляцией со всеми основными элементами за исключением MgO . MgO , в свою очередь, имеет обратные связи со всеми другими основными элементами.

Основные элементы: алюминий, титан, железо, марганец, кальций, натрий и калий - характеризуются положительными связями между собой.

Отрицательная корреляция кремния с основными элементами подтверждает то, что SiO_2 представлен, преимущественно, в виде кварцевых зерен.

Значения отношения содержаний $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ высоки (среднее значение 28.82) и указывают на происхождение обломочного материала из континентального источника. SiO_2 имеет сильную отрицательную связь с K_2O ($r=-0.95$), свидетельствующую об уменьшении глинистого материала с увеличением содержания кварца. Al_2O_3 имеет сильную положительную связь с K_2O ($r=0.93$). Это указывает на то, что К-содержащие минералы значительно влияют на распределение Al и, в общем, Al и К происходят из глинистых минералов (например, иллита) [McLennan et al., 1993].

Однако вклад полевых шпатов и слюд в обеспечение осадков Al и К также фиксируется по отношению $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ (среднее значение составляет 5.51).

Значения отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ изменяются от 1.48 до 4.85. Высокие значения данного отношения указывают на присутствие калиевых полевых шпатов, мусковита и биотита [McLennan et al., 1993].

Низкие содержания TiO_2 (среднее содержание составляет 0.33 wt.%) указывают на присутствие филлосиликатов (слоистых листовых силикатов) в малых количествах.

Na_2O демонстрирует отрицательную корреляцию с SiO_2 ($r=-0.19$) и MgO ($r=-0.43$). MgO отрицательно коррелирует с CaO ($r=-0.22$). Подобные взаимосвязи могут указывать на присутствие смектита.

Присутствие MgO в песчаниках и его положительная корреляция с SiO_2 ($r=0.22$) свидетельствуют о наличии биотита. $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ имеет сильную положительную связь с Al_2O_3 ($r=0.90$), что указывает на наличие хлорита и ферромагнитных минералов.

Высокое содержание Fe_2O_3 (среднее содержание 4.79wt.%) указывает на то, что часть Fe_2O_3 осаждалась как лимонит/гетит.

CaO отрицательно коррелирует с SiO_2 ($r=-0.99$), что позволяет заключить, что кальций, в первую очередь, находится в карбонатах.

Если рассматривать группу элементов (Co, Cu, Ni, Zn, Cr), то следует отметить, что Co и Cu имеют положительные корреляционные связи с Al_2O_3 ($r=0.24$; 0.28), TiO_2 ($r=0.14$; 0.28), Fe_2O_3 ($r=0.16$; 0.22), MnO ($r=0.21$; 0.09), CaO ($r=0.28$; 0.33) и K_2O ($r=0.14$; 0.27). Положительные связи Co и Cu с Al_2O_3 , TiO_2 и K_2O рассматриваются как индикаторы того, что Co и Cu адсорбированы глинистыми минералами.

Ni и Zn положительно коррелируют с MgO ($r=0.48$; 0.38), а последний, как было отмечено выше, имеет положительные связи с SiO_2 ($r=0.22$).

Cr имеет положительную связь с SiO_2 ($r=0.32$), Ni ($r=0.32$) и Zn ($r=0.38$).

Ni положительно коррелирует с Co ($r=0.26$) и Cu ($r=0.14$).

Песчаники характеризуются низкими содержаниями Cr (в среднем 68 ppm) и Ni (в среднем 14 ppm). Отношение Cr/Ni варьирует от 3.27 до 6.4 ppm (в среднем 5.12 ppm). Эти особенности указывают на то, что Cr, Ni и Zn, вероятнее всего, входят в состав глинистых минералов, хлорита и ферромагнитных минералов.

Питающая провинция

Минералогический и химический состав кремнекластовых осадочных пород связан с составом питающей провинции и отражает ее тектоническое положение. Треугольные диаграммы Дикинсона и Сакзека [Dickinson et al., 1983] широко используются для выяснения тектонического режима питающей провинции для песчаников.

На рис.3 показана треугольная диаграмма соотношения кварца (Qt), полевых шпатов (F) и обломков пород (L) для 4 образцов песчаников.

Диаграмма указывает на орогенную питающую провинцию, сложенную осадочными и вулканогенными породами, частично метаморфизированными, которые подверглись эрозии во время орогенеза. Согласно [Roser & Korsch, 1988] состав орогенной питающей провинции, в свою очередь, определялся начальными гранито-гнейсовыми массивами и/или осадочными террасами

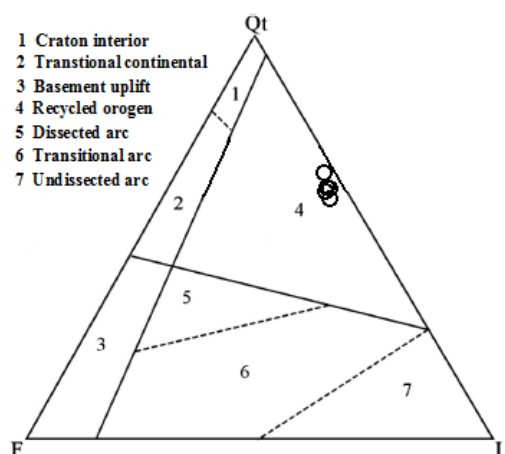


Рис.3. Qt-F-L диаграмма тектонических условий по данным четырех образцов, имеющих следующий состав:

Образец №	Кварц Qt	Полевые шпаты F	Обломки пород L
1	66.80	2.50	30.71
2	69.15	1.68	29.10
3	65.93	3.12	30.84
4	66.32	2.32	31.26
Среднее	67.05	2.41	30.48

Тектонические условия: 1 – кратон, 2 – переходные континентальные, 3 – поднятие фундамента, 4 – ороген (рециклированный), 5 – свод нарушенный, 6 – переходный свод, 7 – ненарушенный свод.

Существует еще ряд диаграмм для расшифровки пород источника сноса для кремнекластовых осадков, например диаграмма, представленная на рис.4, где песчаники относятся к области, сложенной кварцевыми осадочными породами.

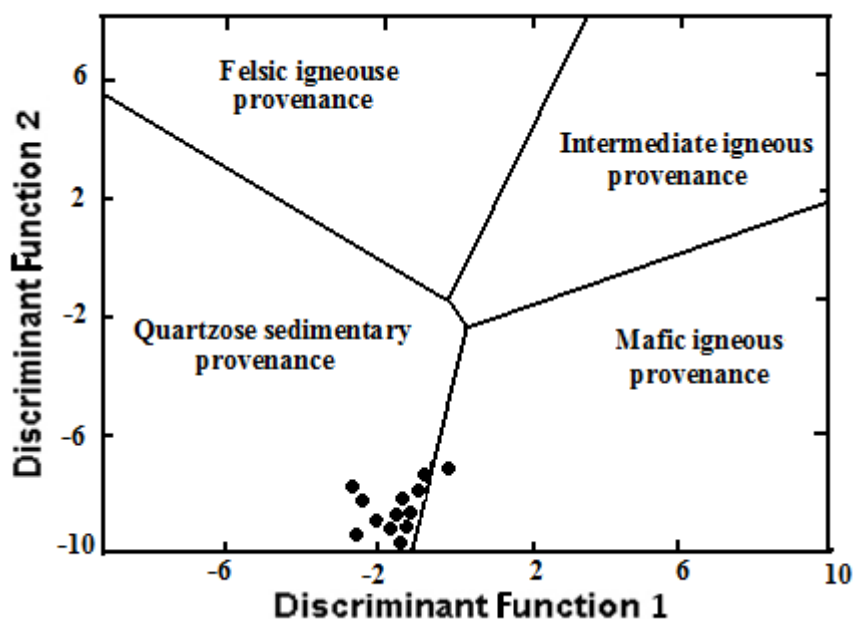


Рис.4. Дискриминантная диаграмма для песчаников (по [Roser& Korsch, 1988]). Дискриминантная функция 1 (Discriminant Function 1) = $(-1.773\text{TiO}_2\%) + (0.607\text{Al}_2\text{O}_3\%) + (0.76\text{Fe}_2\text{O}_3\%) + (-1.5\text{MgO}\%) + (0.616\text{CaO}\%) + (0.509\text{Na}_2\text{O}\%) + (-1.22\text{K}_2\text{O}\%) + (-9.09)$. Дискриминантная функция 2 (Discriminant Function 2) = $(0.445\text{TiO}_2\%) + (0.07\text{Al}_2\text{O}_3\%) + (-0.25\text{Fe}_2\text{O}_3\%) + (-1.142\text{MgO}\%) + (0.432\text{Na}_2\text{O}\%) + (1.426\text{K}_2\text{O}\%) + (-6.861)$.

Такая область может быть сложена песчаниками, глинами, аргиллитами, алевролитами и их метаморфическими эквивалентами, а кластика, входящая в их состав может происходить из предшествующих осадочных и метаморфических пород.

Например, в используемой диаграмме (рис.4) границы кварцевой области определялись на основе химического состава пород центральной части Новой Зеландии, которая сложена песчаниками и аргиллитами ордовика, которые, в свою очередь, образовались в результате выветривания массивов, сложенных гранитами и гнейсами, а также осадочными породами.

Интересной в реконструктивном отношении является методика Хайяши [Hayashi et al., 1997]. Она основывается на том, что содержания Al_2O_3 и TiO_2

рассматриваются как существенные индикаторы питающей провинции. В процессе выветривания пород источника сноса Al и Ti остаются малоподвижными элементами из-за низкой растворимости их оксидов и гидроксидов в низкотемпературных водных растворах [Юдович, Кетрис, 2000]. Следовательно, значения отношения Al/Ti в остаточных почвах могут рассматриваться близкими к таковым в материнских магматических породах. В детритовом материале магматических пород Al типично привязан к глинистым минералам (например, каолинит, иллит, смектит), слюдам и полевым шпатам. Ti оказывается в составе глинистых и мафических минералов (биотит, хлорит, ильменит). Во время флювиальной транспортировки этих минералов Al и Ti перераспределяются незначительно, поэтому отношение содержаний алюминия и титана близко к таковому в породах источника сноса.

Хорошо известно, что в магматических породах Al концентрируется, в основном, в полевых шпатах, а Ti - в мафических минералах (например, оливин, пироксен, горнблендит, биотит, ильменит). Поэтому отношение Al/Ti магматических пород увеличивается с увеличением содержания SiO₂. Значения отношения Al₂O₃/TiO₂ увеличиваются от 3 до 8 в основных магматических породах с содержанием SiO₂ в интервале 45-52 wt.%; от 8 до 21 в средних магматических породах с содержанием SiO₂ в интервале 53-66 wt.%; и от 7 до 21 – в кислых магматических породах с содержанием SiO₂ в интервале 66-76 wt.%. Согласно Хайяши (1997) содержание SiO₂ в магматических породах может быть оценено по отношению Al₂O₃/TiO₂ с помощью следующего выражения:

$$\text{SiO}_2 (\text{wt. \%}) = 39.34 + 1.2578 (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2) - 0.0109 (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2)^2$$

В случае нашей выборки оценка содержания SiO₂ составляет 66.32-69.15 wt.% (среднее 67.05 wt.%) и относится к кислым магматическим породам.

На диаграмме МакЛеннана [McLennan et al., 1993] источник сноса по взятой выборке образцов характеризуется как гранодиорит (рис.5а). Содержания Cr и Ni в кремнекластовых осадочных образованиях также

рассматриваются как полезные индикаторы питающей провинции. Например, Флойд [Floyd et al., 1989] предложил диаграмму TiO_2 wt.% - Ni (ppm) для оценки состава пород питающей провинции. На этой диаграмме исследуемые песчаники попадают в область кислых магматических пород (рис.5b).

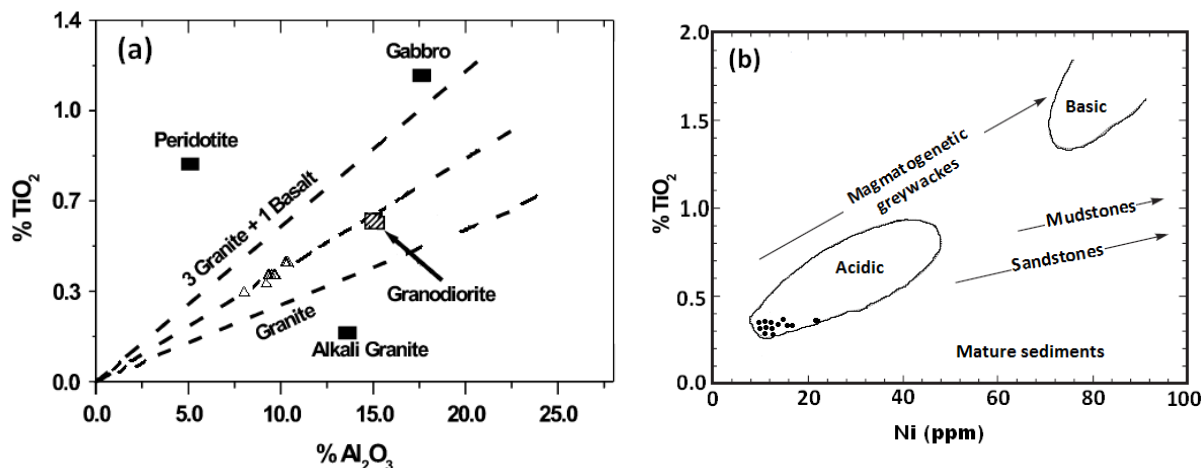


Рис.5. (a) диаграмма МакЛеннона, (b) диаграмма Флойда

В целом, можно сделать вывод, что исследуемые песчаники можно интерпретировать как связанные с источником сноса, сложенным кварцевыми осадочными породами (проксимальный вариант) и гранодиоритами (ультимативный вариант). Проксимальные породы формировались в условиях пассивной континентальной окраины, интракратонных бассейнов или рециклированных орогенных провинций.

Палеовыветривание

Интенсивность химического выветривания пород источника сноса определяется составом пород, продолжительностью выветривания, климатическими условиями и скоростями тектонического поднятия региона питающей провинции. Около 75% лабильного материала верхней части земной коры состоит из полевых шпатов и вулканического стекла. Химическое выветривание этого материала, в конце концов, приводит к образованию глинистых минералов [Taylor and McLennan, 1985]. В процессе химического выветривания Ca, Na и K, в основном, выносятся из пород источника сноса. Содержание этих элементов в почвенных профилях является чувствительным

индикатором интенсивности химического выветривания. Показатели (K_2O+Na_2O) и K_2O/Na_2O рассматриваются как индикаторы интенсивности выветривания пород питающей провинции при условии отсутствия постседиментационных изменений щелочного характера.

Степень выветривания пород питающей провинции оценивается с помощью различных индексов, в общем, базирующихся на соотношениях подвижных и неподвижных оксидов элементов (Na_2O , CaO , K_2O и Al_2O_3):

CIA (Chemical Index of Alteration) [Nesbitt & Young, 1982] – химический индекс изменчивости $CIA = \{Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)\} \times 100$;

PIA (Plagioclase Index of Alteration) [Fedo et al., 1995] – плагиоклазовый индекс изменчивости $PIA = \{(Al_2O_3 - K_2O) / ((Al_2O_3 - K_2O) + CaO^* + Na_2O)\} \times 100$;

CIW (Chemical Index of Weathering) [Harnois, 1988] – химический индекс выветривания $CIW = \{Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)\} \times 100$

CIW' – химический индекс выветривания для кремнекластовых пород с включением карбонатного вещества $CIW' = \{Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O)\} \times 100$.

В приведенных выражениях оксиды имеют молярное выражение, а CaO^* - это содержание CaO в силикатах.

Для изучаемой выборки содержание CaO в песчаниках изменяется от 2.43 до 2.89% (среднее значение 2.74%). Содержание P_2O_5 изменяется от 0.1 до 0.16%. Оно относится к не прямому методу различения и оценки содержаний CaO в силикатах и карбонатах+апатитах. Если значения CIA определить исходя из предположения, что содержание CaO в песчаниках равно содержанию CaO в силикатах, то CIA в этом случае варьирует в нереальном интервале от 51.79 до 56.03 (среднее 53.98). МакЛеннан [McLennan et al., 1993] предложил следующий непрямой метод оценки CaO в силикатах, используя значения отношения Ca/Na в силикатах. Процедура оценки МакЛеннана включает в себя вычитание молярной пропорции P_2O_5 из молярной пропорции общего CaO . Если оставшееся число молей меньше, чем молярная пропорция Na_2O , тогда это

число молей принимается как молярная пропорция CaO в силикатной фракции. Если оставшееся число молей больше, чем молярная пропорция Na_2O , тогда последняя принимается как содержание CaO в силикатной фракции (CaO^*).

В нашем случае гранодиориты – ультимативные породы питающей провинции. Типичный гранодиорит состоит из более или менее равных количеств CaO (2.95% - то есть 0.0524 молей Ca) и Na_2O (3.31% - то есть 0.534 молей Na). После применения метода МакЛеннана были получены следующие значения индексов $\text{CIA}=61.69\text{-}76.19\%$ (среднее 69.07%); $\text{PIA}=65.62\text{-}87.12\%$ (среднее 76.63%); $\text{CIW}=70.55\text{-}89.34\%$ (среднее 80.29%); $\text{CIW}'=82.73\text{-}94.37\%$ (среднее 88.94). Значения PIA и CIW указывают на более высокую степень выветривания (от умеренного до интенсивного), чем значения CIA (умеренное выветривание). В целом, заключение об интенсивности выветривания пород источника сноса по трем показателям – от умеренного до интенсивного.

Приведенные выше индексы выветривания/изменения отражают сумму интенсивностей химического выветривания литокомпонентов в течение, по крайней мере, двух циклов седиментации, включающих химическое выветривание пород питающей провинции (ультимативные гранодиориты и проксимальные осадочные породы); химическое выветривание во время водной транспортировки обломочного материала; химическое выветривание обломочного материала в местах его разгрузки; химическое выветривание во время диагенеза.

PIA отражает выветривание полевых шпатов с трансформацией их в глинистые минералы при разрушении пород источника сноса, транспортировке, седиментации и диагенезе. На начальных стадиях ионы Ca извлекаются быстрее, чем ионы Na и K . С увеличением выветривания общее щелочное содержание ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) уменьшается с увеличением отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Это связано с более быстрым удалением плагиоклазов по сравнению с калиевыми полевыми шпатами [Nesbitt and Young, 1982].

Подвижность элементов в течение финальных стадий химического выветривания полевых шпатов может быть оценена по бивариационным диаграммам, включающим Na_2O , K_2O , CaO , SiO_2 и PIA.

В диаграмме $(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ -PIA значения отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ увеличиваются с увеличением значений PIA ($r=0.95$, рис.6a). В диаграмме $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ wt.% - PIA общее содержание щелочных элементов уменьшается с увеличением значений PIA ($r=-0.32$, рис.6b). Слабая отрицательная связь в последнем случае может быть объяснена присутствием калиевых минералов (например, мусковита и иллита).

Поведение Na во время прогрессирующего выветривания можно увидеть на диаграмме Na_2O wt.% - PIA (рис.7a). Содержание Na_2O уменьшается с увеличением значений PIA ($r=-0.96$). На диаграммах CaO wt.%-PIA (рис.7b) и K_2O wt.%-PIA (рис.7c) отмечается уменьшение CaO и K_2O с увеличением PIA. Слабые отрицательные связи на обеих диаграммах могут быть следствием присутствия карбонатов и калиевых минералов (мусковита, биотита), а также процессов образования иллита.

Описанные особенности позволяют предположить, что вероятнее всего, большую роль сыграли процессы химического выветривания обломков полевых шпатов в области разгрузки и на стадии диагенеза.

Наблюдаемое систематическое уменьшение содержания Na_2O с увеличением степени выветривания полевых шпатов (рис.7a) подтверждает подобную гипотезу, тем более, что полевошпатовые зерна способны «выживать» больше, чем в одном седиментационном цикле.

Мобильность элементов во время химического выветривания может быть также оценена с помощью треугольной диаграммы $\text{A}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ -CN ($\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}^*$)-K (K_2O) в молярном выражении [Nesbitt and Young, 1982].

На диаграмме A-CN-K (рис.8) наблюдается линейный тренд субпараллельный к линии A-CN. Это можно объяснить тем, что скорости выветривания Na и Ca из плагиоклазов или вулканического стекла в основном

больше, чем таковые для К из микроклина или вулканического стекла. Тренд направлен к иллиту на стороне А-К (рис.8). График не наклонен к вершине К, указывая на то, что песчаники не подвергались калиевому метасоматозу во время диагенеза. При экстраполяции тренда к вершине А отмечается пересечение с областью гранодиорита (ультимативная питающая провинция). Линейность тренда указывает на стабильность условий выветривания.

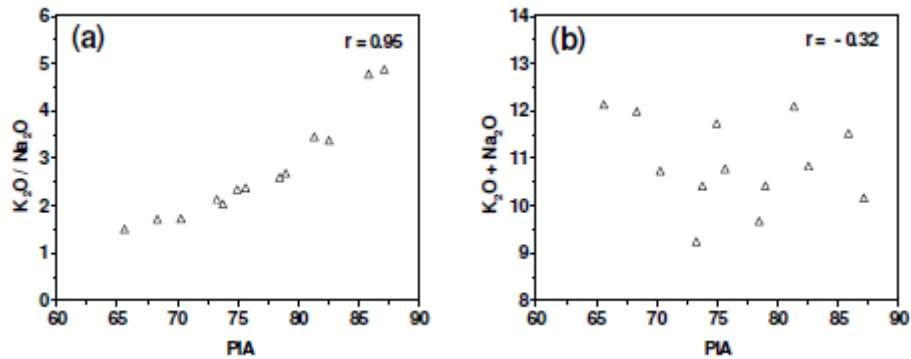


Рис.6.

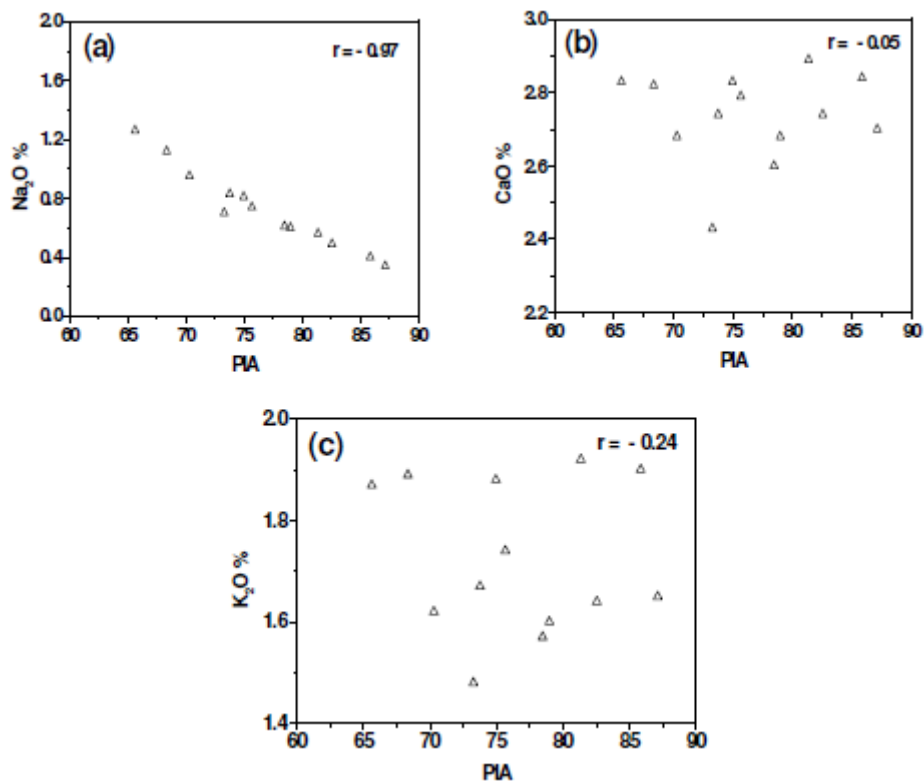


Рис.7.

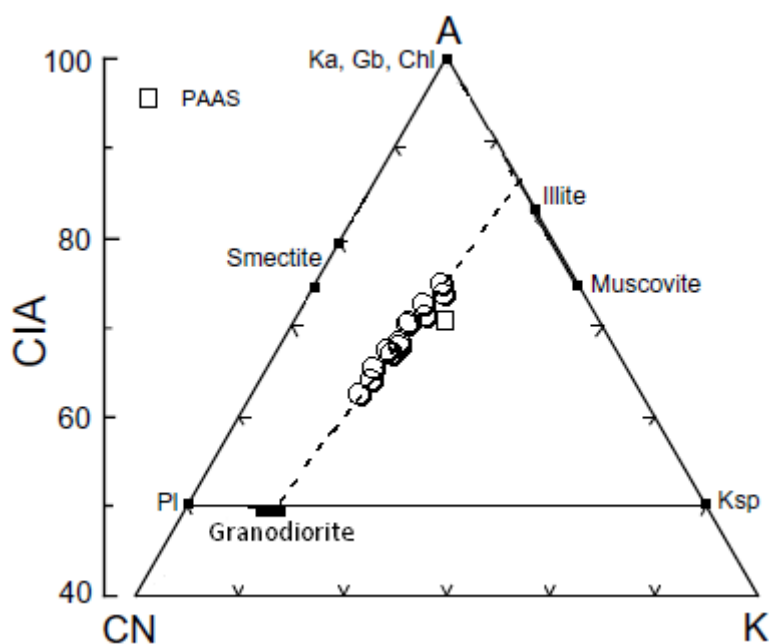


Рис.8.

Зрелость осадка и климатические условия во время седиментации

Отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ чувствительно к осадочному рециклированию (переотложению) и процессам выветривания и может быть использовано как показатель зрелости осадка. Самыми устойчивым к выветриванию является кварц. Среднее значение отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в неизмененных магматических породах варьирует от ~ 3.0 (основные породы) до ~ 5 (кислые породы). Значения отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 5.0$ представляет точку отсчета прогрессирующего созревания осадка [Roser et al., 1986].

Соотношение средних Qt:F:L в изучаемых песчаниках составляет 67.25:2.41:30.48 (рис.3). Значения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ варьируют от 7.3 до 9.82 (среднее 8.04). Значения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ изменяются от 1.48 до 4.85 (среднее 2.71). Присутствие обломков пород и полевых шпатов (33 wt.%), низкие значения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и высокие значения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ указывают на степень зрелости осадка от низкой к умеренной. Такая степень зрелости песчаников позволяет предположить активный апифтинг питающей провинции, быстротечную эрозию, короткие пути транспортировки обломочного материала и его плохую сортировку.

Индексы выветривания осадочных пород помогают интерпретировать тектоническую активность и климатические условия питающей провинции. Увеличение степени химического выветривания могут отражать уменьшение тектонической активности и/или потепление и гумидизацию климата, благоприятные для химического выветривания. Песчаники в нашем случае состоят из малых количеств (до 3 wt.%) полевых шпатов, в том числе измененных. Саттнер и Дутта (1986) [Suttner and Dutta, 1986] предложили использовать диаграмму SiO_2 wt.% - $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ wt.% для интерпретации климатических условий в процессе формирования кремнекlastовых осадков. Изучаемые песчаники попадают в область гумидного климата (рис.9), который косвенно подтверждается углистыми прослоями в разрезах районов соседних с районом обнажений территорий.

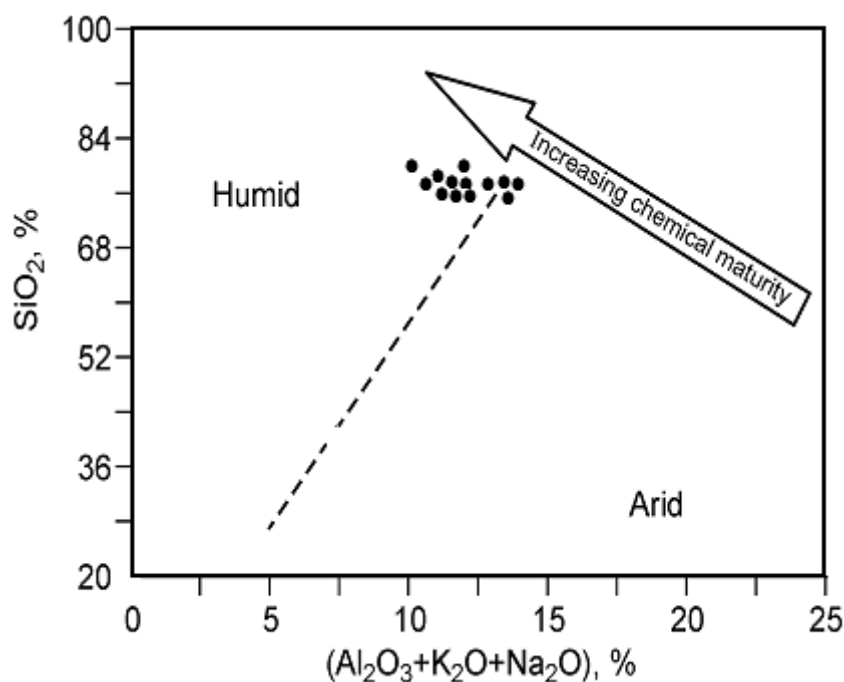


Рис.9.

Тектонические условия

Тектонические условия являются одним из факторов питающей провинции и бассейна осадконакопления. Для их выяснения разработан ряд дискриминантных диаграмм.

Данные по песчаникам размещены в восьми таких диаграммах (рис.10)

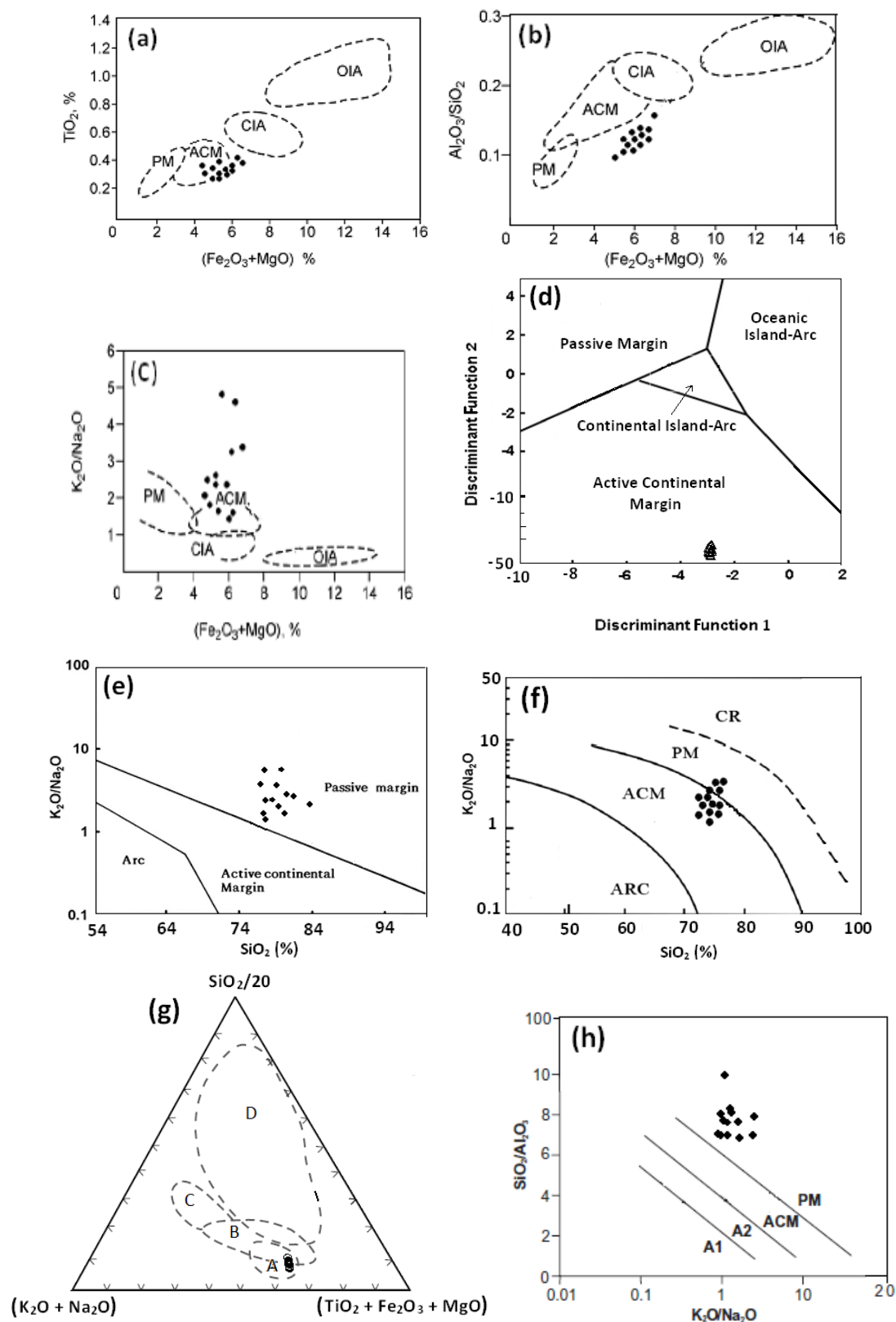


Рис.10. (a) $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ wt.% - TiO_2 wt.% диаграмма [Bhatia, 1983].

PM: Passive Margin – пассивная окраина, ACM: Active Continental Margin –

активная континентальная окраина, CIA: Continental Island Arc – континентальная островная дуга, OIA=Oceanic Island Arc – океаническая островная дуга; (b) $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ wt.% - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ диаграмма [Bhatia, 1983]. (c) $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ wt.% - $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ диаграмма [Bhatia, 1983]. (d) дискриминантная диаграмма [Bhatia, 1983]. Дискриминантная функция 1 = $(-0.0447\text{SiO}_2\%) + (-0.972\text{TiO}_2\%) + (0.008\text{Al}_2\text{O}_3\%) + (-0.267\text{Fe}_2\text{O}_3\%) + (0.208\text{FeO}\%) + (-3.082\text{MnO}\%) + (0.140\text{MgO}\%) + (0.195\text{CaO}\%) + (0.719\text{Na}_2\text{O}\%) + (-0.032\text{K}_2\text{O}\%) + (7.510\text{P}_2\text{O}_5\%)$. Дискриминантная функция 2 = $(-0.421\text{SiO}_2\%) + (1.988\text{TiO}_2\%) + (-0.526\text{Al}_2\text{O}_3\%) + (-0.551\text{Fe}_2\text{O}_3\%) + (-1.610\text{FeO}\%) + (2.720\text{MnO}\%) + (0.881\text{MgO}\%) + (-0.907\text{CaO}\%) + (-0.117\text{Na}_2\text{O}\%) + (-1.840\text{K}_2\text{O}\%) + (7.244\text{P}_2\text{O}_5\%)$. (e) SiO_2 wt.% - $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ диаграмма [Roser & Korsch 1986]. (f) SiO_2 wt.% - $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ диаграмма [Roser & Korsch, 1986] CR = Continental Rift – континентальный рифт. (g) $\text{SiO}_2 / 20$ wt.% - $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ wt.% - $(\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ wt.% треугольная диаграмма [Kroonenberg, 1994]. А: Океаническая островная дуга, В: континентальная островная дуга, С: активная континентальная окраина, D: пассивная окраина. (h) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ диаграмма [Maynard et al., 1982]. А1 – дуговая обстановка, обломки базальта и андезита, А2 – эволюционирующая дуговая обстановка, полевошпатовый и вулканический материал.

Большая часть построений указывает на активную континентальную окраину. Отличия в других построениях (10 e, h) могут быть связаны с высоким содержанием СаО и K_2O и низким содержанием Na_2O в исследуемых песчаниках.

В обстановках активной континентальной окраины отложения источника сноса формировались в бассейнах зоны субдукции: arc basins, strike-slip margins, and in proximal portions in back-arc basins [Campos et al., 2007], что согласуется с геотектонической историей Юго-Западной Азии.

Иранская плита – это основной сегмент Киммерийского микроконтинента, части северо-восточной Гондваны, отделившейся от

Гондваны в поздней перми. Микроконтинент двигался на север и столкнулся с Туранской плитой (коллизия продолжалась до конца среднего триаса [Мурзагалиев, 1998]. Раннекиммерийский орогенез обусловил дальнейший седиментационный режим. Среднетриасовые платформенные карбонаты сменились мощной молассовой толщей кремнекластовых отложений позднего триаса - средней юры форланда. Поднятие и эрозия Киммерийской горной цепи обусловили формирование обломочного материала формирования изучаемых юрских отложений.

ГЛИНИСТЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Геохимия глинистых отложений

Содержания основных и второстепенных элементов, а также значения геохимических индексов по четырем глинистым образцам показаны в таблице 2. В анализируемых образцах содержания основных элементов очень близки: 65.52 - 67.45 wt.% SiO_2 ; 16.12 - 19.25 wt.% Al_2O_3 ; 0.41 - 0.48 wt.% TiO_2 ; 4.78-7.03 wt.% Fe_2O_3 ; 0.62 - 1.38 wt.% MgO ; 0.18 - 0.79 wt.% CaO ; 0.30 - 0.49 wt.% Na_2O ; 1.89 - 2.17 wt.% K_2O и 0.15 - 0.22 wt.% P_2O_5 .

Среди второстепенных элементов Co варьирует от 14.31 до 15.74 ppm; Cr – от 92 до 108 ppm; Cu – от 25 до 48 ppm; Ni – от 18 до 33 ppm; Zn – от 71 до 85 ppm.

По полученным данным выявляются следующие геохимические особенности глинистых отложений. На диаграмме $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (рис.11) образцы ожидаемо находятся в области протерозоя-фанерозоя.

Рис.12 показывает распределение содержаний элементов, нормированных к PAAS (Post Archaean Australian Shale [Taylor and McLennan, 1985]). Наблюдается относительно слабое обеднение в содержаниях TiO_2 , K_2O , MnO , Cr и Cu и умеренное обеднение в содержаниях MgO , CaO , Na_2O , Co and Ni. Последний факт может быть объяснен меньшим содержанием обломков

плагиоклазов в глинах и/или сравнительно интенсивным химическим выветриванием пород источника сноса, а также выветриванием во время водной транспортировки обломочного материала в область разгрузки.

Таблица 2.

Элементы	№ образцов				Среднее	РААС
	1Г	2Г	3Г	4Г		
SiO ₂ ,wt. %	65,52	66,8	63,78	67,45	65,89	62,4
Al ₂ O ₃ ,wt. %	17,83	18,7	16,12	19,25	17,98	18,78
TiO ₂ ,wt. %	0,46	0,46	0,41	0,48	0,45	0,99
Fe ₂ O ₃ ,wt. %	7,03	4,74	7,24	5,72	6,18	7,18
MnO,wt. %	0,05	0,09	0,13	0,07	0,09	0,11
CaO,wt. %	0,18	0,61	0,79	0,76	0,59	1,29
MgO,wt. %	0,62	0,92	1,38	0,87	0,95	2,19
Na ₂ O,wt. %	0,3	0,41	0,49	0,46	0,42	1,19
K ₂ O,wt. %	1,89	1,99	2,17	1,73	1,95	3,68
P ₂ O ₅ ,wt. %	0,16	0,15	0,18	0,22	0,18	0,16
SO ₃ ,wt. %	0,05	0,08	0,11	0,06	0,08	
ППП,wt. %	5,76	4,9	6,48	2,81	4,99	
Сумма,wt. %	99,85	99,85	99,28	99,88	99,72	
Co, ppm	14,31	15,74	13,5	15,16	14,68	23
Ni, ppm	18	33	25	24	25,00	55
Cu, ppm	25	36	48	41	37,50	50
Zn, ppm	85	71	75	83	78,50	85
Cr, ppm	97	92	108	104	100,25	110
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	38,76	40,6	39,31	40,1	39,69	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,67	3,57	3,95	3,5	3,67	
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0,11	0,11	0,13	0,09	0,11	
Ni/Co	1,25	2,09	1,85	1,58	1,69	
Cu/Zn	0,29	0,5	0,64	0,49	0,48	
ICV	0,58	0,48	0,77	0,52	0,59	
CIA, %	86,62	84,22	80,27	85,04	84,04	
PIA, %	95,69	92,47	89,52	91,99	92,42	
CIW, %	96,19	93,27	90,91	92,71	93,27	
CIW', %	97,3	96,52	95,23	96,22	96,3175	

Обеднение в содержаниях TiO₂, K₂O, MnO, Cr и Cu указывает на сокращенное присутствие филлосиликатов и ферромагнитных минералов.

Низкое содержание TiO_2 может указывать на полевошпатово-кварцевый состав пород источника сноса.

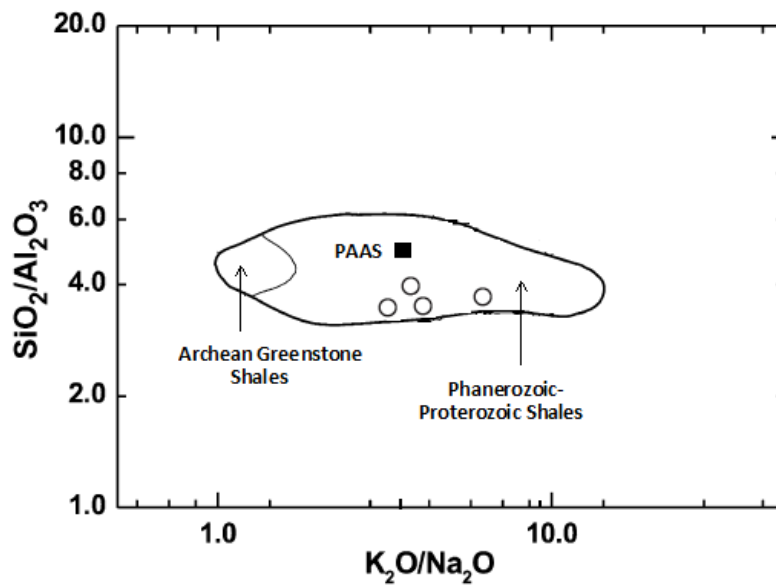


Рис.11.

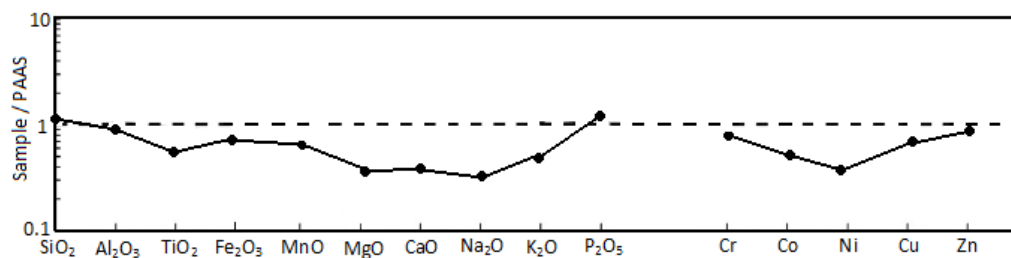


Рис.12.

Значение ICV изменяются от 0.48 до 0.77 (среднее 0.59), то есть меньше 1, что типично для присутствия каолинита, иллита и мусковита в породах.

Значения отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в глинах меньше 0.3, а в полевых шпатах изменяются от 0.3 до 0.9. В изучаемых глинистых образцах значение этого отношения изменяется от 0.08 до 0.13 (среднее 0.10), что указывает на доминирование глинистых минералов на калиевыми полевыми шпатами и слюдами.

Значения отношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ высоки (среднее 39.95) и свидетельствуют о происхождении обломочного материала с источника на континенте.

SiO₂ имеет сильную отрицательную связь с K₂O ($r=-0.83$), показывающую уменьшение содержания калиевых минералов (в данном случае, калиевых полевых шпатов, мусковита и биотита) с увеличением содержания кварца.

SiO₂ положительно коррелирует с Al₂O₃ ($r=0.99$) и TiO₂ ($r=0.94$).

Al₂O₃ имеет сильную положительную связь с TiO₂ ($r=0.96$). Такие линейные связи между указанными элементами подтверждают их совместный обломочный генезис.

Положительная корреляция TiO₂ с Al₂O₃ и отрицательные связи TiO₂ с (Fe₂O₃, MnO, CaO, MgO, Na₂O и K₂O) позволяют предположить, что TiO₂ в большей степени является компонентом глинистых минералов (каолинит), чем мафических минералов. Низкие содержания TiO₂ (среднее = 0.45 wt.%) указывают на содержание филлосиликатов в небольших количествах.

Al₂O₃ имеет сильную отрицательную связь с K₂O ($r=-0.86$) и сильную положительную связь с SiO₂ ($r=0.99$). Эти линейные тренды указывают на присутствие каолинита.

Значения отношения K₂O/Na₂O изменяются от 3.76 до 6.30 (среднее = 4.83), что служит индикатором присутствия калиевых минералов (калиевых полевых шпатов, мусковита и биотита).

Na₂O имеет положительную связь с CaO ($r=0.99$) и MgO ($r=0.84$) и отрицательную связь с Fe₂O₃ ($r=-0.10$), Al₂O₃ ($r=-0.20$) и SiO₂ ($r=-0.12$), что косвенно позволяет предположить об отсутствии смектита в образцах.

CaO не коррелирует с SiO₂. То есть, если карбонатные минералы имеются в составе глин, характеризуются вторичным генезисом. Второстепенные элементы (Co, Ni, Zn, Cu and Cr), Co, Ni и Zn имеют положительные корреляции с SiO₂, Al₂O₃ и TiO₂, что указывает на их присутствие в составе адсорбированных компонентов.

Cu и Cr положительно коррелируют с MnO, CaO, MgO, Na₂O и K₂O, что позволяет предположить их нахождение в мафических минералах глин.

Питающая провинция

На рис.13 показана дискриминантная диаграмма, использованная для песчаников (рис.4). На этой диаграмме исследуемые глинистые образцы относятся к области мафической магматической провинции.

На диаграмме Флойда (рис.14а) эти же образцы относятся к кислым магматическим породам.

Видимо, эти диаграммы «не работают» в данном случае и требуется иной подход, например, методика Хайяши, описанная в разделе, посвященном песчаникам.

Согласно Хайяши (1997) содержание SiO_2 в магматических породах может быть оценено по отношению $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ с помощью следующего выражения:

$$\text{SiO}_2 (\text{wt. \%}) = 39.34 + 1.2578 (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2) - 0.0109 (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2)^2$$

Подставляя значения отношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, рассчитанные для глинистых образцов, получаем содержание SiO_2 71.72-72.45 wt. % (среднее 72.09 wt. %), характерное для felsic group igneous rocks - кислых магматических пород.

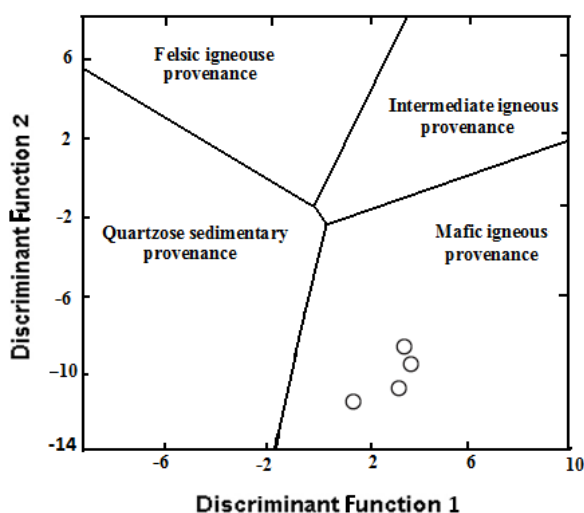


Рис.13.

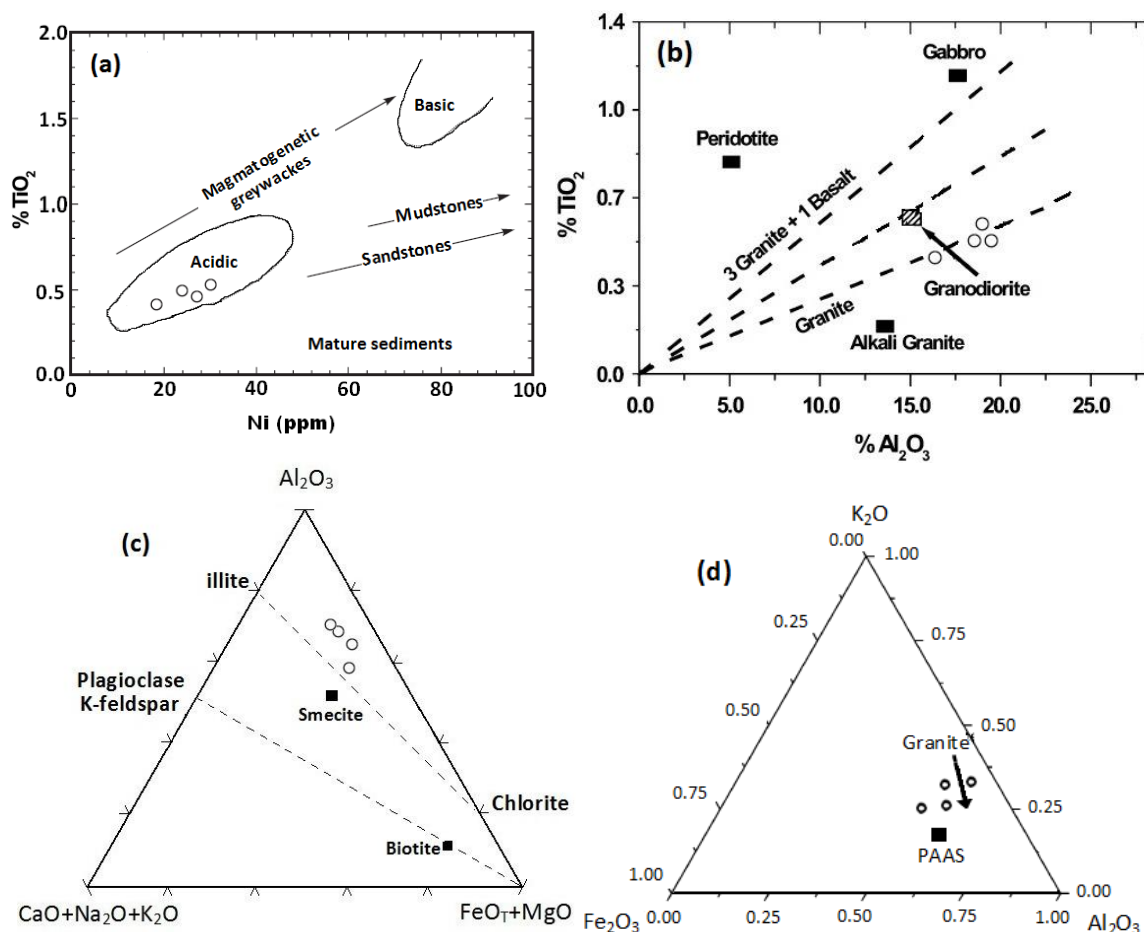


Рис.14. Диаграммы для распознавания состава питающей провинции. – диаграмма Флойда; (b) – диаграмма МакЛеннана; (c) треугольная диаграмма Хайяши $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{FeO} + \text{MgO})$ [Hayashi et al., 1997]; (d) $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ треугольная диаграмма Конди [Condie, 1993].

На диаграмме МакЛеннона (рис.14b) выявляется кислый магматический состав (гранитный тренд) питающей провинции. На треугольных диаграммах Хайяши (рис.14c) и Конди (рис.14d) данная интерпретация также подтверждается.

Таким образом, гипотезу об основном магматическом составе питающей провинции (по рис.13) можно отвергнуть.

Палеовыветривание

Содержание CaO в глинистых образцах изменяется от 0.18 до 0.79 wt.% (среднее = 0.58 wt. %). Содержание P_2O_5 варьирует от 0.15 до 0.22 wt.%. Оно

используется для определения принадлежности кальция к силикатной или несиликатной фракциям (карбонаты, апатиты).

Значения CIA определялись исходя из предположения, что CaO в составе силикатной фракции и составили значения 82.60-86.15% (среднее 82.27%).

Также индексы CIA, PIA, CIW и CIW' определялись по методу МакЛеннона и составили: CIA: 80.27-86.62% (среднее 84.03%); PIA: 82.52-95.69% (среднее 92.41%); CIW: 90.91-96.19% (среднее 93.27%); CIW': 95.23-97.30% (среднее 96.31%).

Так как в образцах отмечается значительное содержание щелочных элементов (среднее 2.30 wt.%), то значения CIW' (завышенная оценка степени выветривания) принимать не следует. По прочим индексам можно сделать заключение о происхождении литокомпонентов в составе глин в результате интенсивного химического выветривания пород питающей провинции.

Подвижность элементов в процессе прогрессирующего выветривания обломков полевых шпатов в глинах может быть распознана путем изучения связей между (Na_2O , K_2O , CaO) и PIA. Устанавливается, что значения отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ увеличиваются с увеличением значений PIA ($r=0.78$). Общее содержание щелочных элементов ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) wt.%-уменьшается с увеличением значений PIA ($r=-0.79$). Отмечается увеличение Na_2O , CaO, K_2O с увеличением значений PIA ($r=-0.96$; -0.93 ; -0.52 соответственно).

Подвижность MgO во время химического выветривания ферромагнитных минералов оценивается по связи MgO wt.% - CIA: отмечается уменьшение MgO с увеличением значений CIA ($r=-0.99$).

На диаграмме A-CN-K (рис.15) глинистые образцы располагаются по линии субпараллельно линии A-CN, что объясняется более высокой скоростью выщелачивания Na и Ca из плагиоклаза, чем K из микроклина. График не наклонен в сторону вершины K, что может указывать на то, что глинистые осадки не подвергались калиевому метасоматозу на стадии диагенеза.

Экстраполяция тренда в прошлое приводит к области гранита (состав питающей провинции).

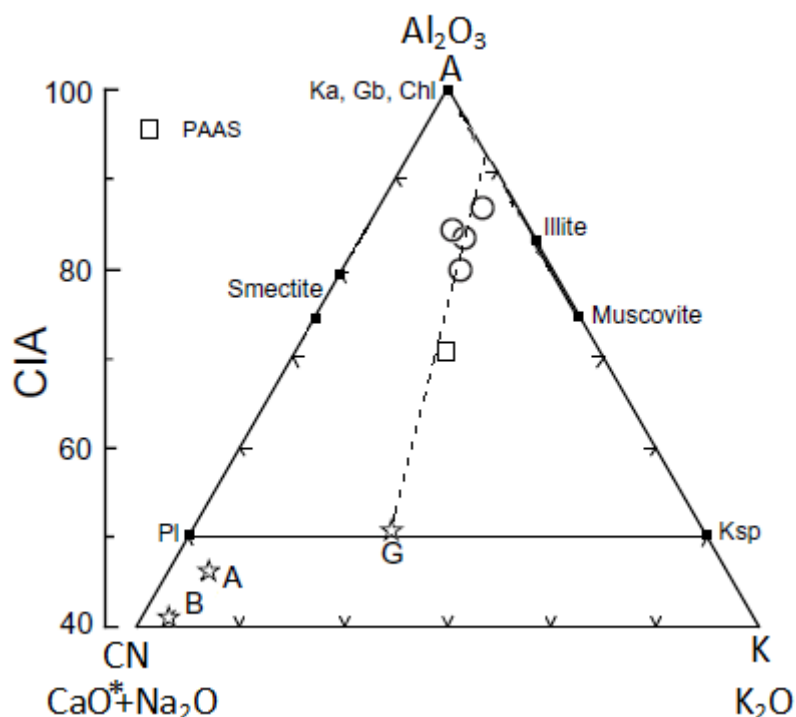


Рис.15: А – CN – К треугольная диаграмма, показывающая тренд выветривания. А = Al_2O_3 ; CN = $(\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})$; К = K_2O (в молях). $\text{CaO}^* = \text{CaO}$ в силикатной фракции. Звездочки: G = Гранит; А = Андезит; В = Базальт.

Зрелость осадка и климатические условия во время седиментации

Увеличение степени химического выветривания может отражать уменьшение тектонической активности и/или изменение климата в направлении потепления и гумидизации. На диаграмме Саттнер и Дутта (рис.16) исследуемые образцы попадают в область семиаридного климата.

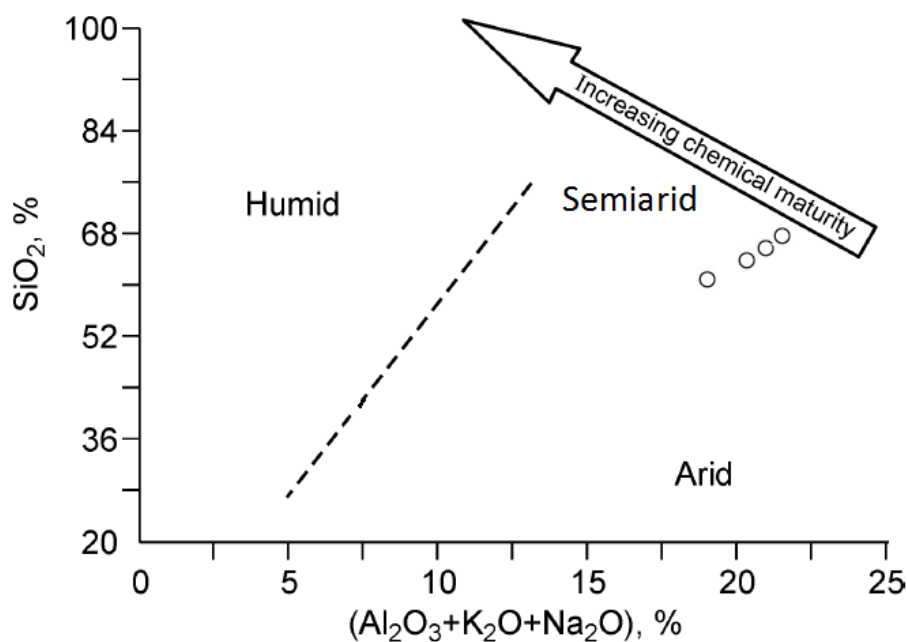


Рис.16.

Окислительно-восстановительные условия во время седиментации кремнекластовых осадков могут быть оценены по характерным геохимическим отношениям. Согласно [Jones and Manning, 1994] значения отношения Ni/Co ниже 5 указывают на окислительные обстановки. Согласно [Hallberg, 1976] высокие значения отношения Cu/Zn указывают на восстановительные условия. В случае исследуемых глинистых образцов значения отношения Ni/Co изменяются от 1.25 до 2.09 (среднее 1.7), а значения отношения Cu/Zn варьируют от 0.29 до 0.64 (среднее 0.48). Низкие значения данных отношений свидетельствуют о формировании глинистых отложений в окислительных условиях.

Тектонические условия

На диаграмме Бхатиа [Bhatia, 1983] (рис.17) глинистые образцы оказываются в области активной континентальной окраины, где образуются бассейны субдукционной группы [Alvarez and Roser, 2007]. Тектонические условия интерпретируются аналогично тектоническим условиям по песчаникам.

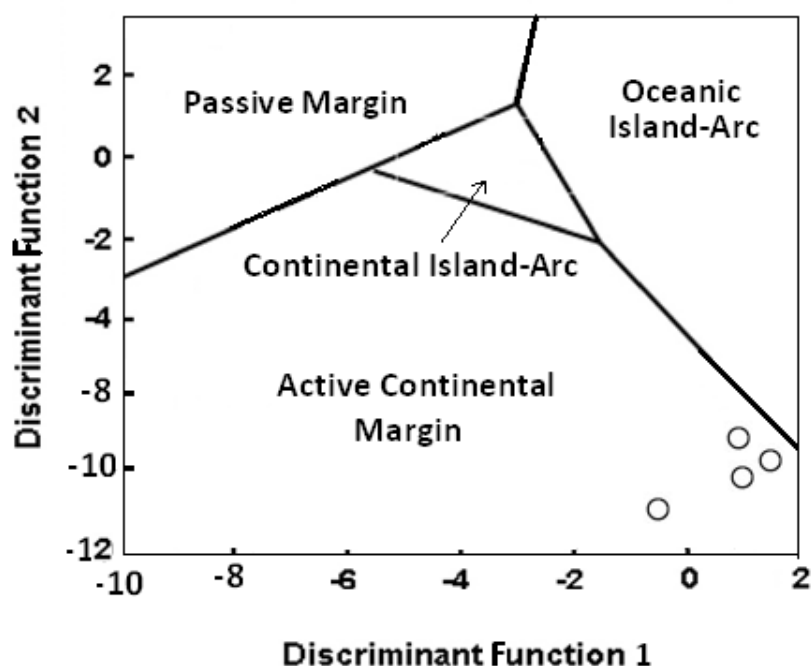


Рис.17. Тектонические условия по [Bhatia, 1983]. Discriminant Function 1 = $(-0.0447\text{SiO}_2\%) + (-0.972\text{TiO}_2\%) + (0.008\text{Al}_2\text{O}_3\%) + (-0.267\text{Fe}_2\text{O}_3\%) + (0.208\text{FeO}\%) + (-3.082\text{MnO}\%) + (0.140\text{MgO}\%) + (0.195\text{CaO}\%) + (0.719\text{Na}_2\text{O}\%) + (-0.032\text{K}_2\text{O}\%) + (7.510\text{P}_2\text{O}_5\%)$. Discriminant Function 2 = $(-0.421\text{SiO}_2\%) + (1.988\text{TiO}_2\%) + (-0.526\text{Al}_2\text{O}_3\%) + (-0.551\text{Fe}_2\text{O}_3\%) + (-1.610\text{FeO}\%) + (2.720\text{MnO}\%) + (0.881\text{MgO}) + (-0.907\text{CaO}\%) + (-0.117\text{Na}_2\text{O}\%) + (-1.840\text{K}_2\text{O}\%) + (7.244\text{P}_2\text{O}_5\%)$.

ИЗВЕСТНЯКИ

Геохимия известняков

Химический состав известняков может служить источником информации для понимания диагенеза и минералогии различных карбонатных фаз. Mg и Sr признаны информативными индикаторами карбонатных фаций [Larsen et al., 1979]. Sr и Mn являются диагенетическими индикаторами из-за различий в коэффициентах разделения, размещении в кристаллических решетках и поведении в морских и метеорных водах. Микритизация в результате

раскристаллизации является общим процессом в мелководных карбонатных зернах тропических регионов мира [Pamela and Macintyre, 1998].

Четыре образца известняка характеризуются определенным составом основных и второстепенных элементов (таблица 3).

Таблица 3.

Элементы	№ образцов				Среднее
	1И	2И	3И	4И	
SiO ₂ , wt. %	9,88	11,43	10,26	12,25	10,96
Al ₂ O ₃ , wt. %	2,44	1,76	2,64	1,7	2,14
TiO ₂ , wt. %	0,09	0,16	0,11	0,18	0,14
Fe ₂ O ₃ , wt. %	5,28	5,73	5,46	5,77	5,56
MgO, wt. %	0,71	0,54	0,66	0,51	0,61
CaO, wt. %	44,86	42,33	43,18	41,22	42,90
Na ₂ O, wt. %	0,03	0,02	0,03	0,22	0,08
K ₂ O, wt. %	0,12	0,13	0,12	0,14	0,13
P ₂ O ₅ , wt. %	0,02	0,06	0,04	0,08	0,05
Mn, wt. %	0,12	0,18	0,15	0,22	0,17
SO ₃ , wt. %	1,25	1,11	1,18	0,96	1,13
ППП, wt. %	35,9	36,66	36,48	36,98	36,51
Сумма, wt. %	100,7	100,11	100,31	100,03	100,29
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0,11	0,11	0,13	0,09	0,11
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,67	3,57	3,95	3,5	3,67
	0,56	0,55	0,59	0,54	0,56
Fe ₂ O ₃ /K ₂ O	3,72	2,38	3,33	3,31	3,19
	0,57	0,37	0,52	0,51	0,49
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	38,76	40,6	39,31	40,1	39,69
K ₂ O/Na ₂ O	6,3	4,85	4,43	3,76	4,84
Hg, ppm	0,33	0,28	0,16	0,24	0,25
As, ppm	12,95	9,68	14,23	12,43	12,32
Cd, ppm	8,36	7,54	11,65	7,31	8,72
Co, ppm	41	28	35	29	33,25
Cr, ppm	184	161	173	188	176,50
Cu, ppm	24	36	35	29	31,00
Mn, ppm	962	869	1012	811	913,50
Ni, ppm	34	43	32	38	36,75
Sr, ppm	251	326	284	221	270,50
Se, ppm	2,17	2,67	2,88	2,14	2,47
Zn, ppm	73	89	84	93	84,75

Содержание SiO_2 изменяется от 9.88 до 12.25 wt.% (среднее=10.96 wt.%). Содержание Al_2O_3 изменяется от 1.70 до 2.64 wt.% (среднее 2.14 wt.%), что указывает на примесный характер глинистых минералов. Содержание Fe_2O_3 варьирует от 5.28 до 5.77 wt.% (среднее 5.56 wt.%), что свидетельствует от железистости известняков. Содержание CaO изменяется от 41.22 до 44.86 wt.% (среднее 42.9 wt.%), что указывает на доминирование кальция в известняках. Содержание MgO мало и изменяется в узком диапазоне 0.51-0.71 wt.% (среднее 0.61 wt.%). Содержание Na_2O изменяется от 0.02 до 0.03 wt.% (среднее 0.03 wt.%). Присутствие натрия рассматривается как возможный индикатор диагенетического привноса. Содержание K_2O изменяется от 0.12 до 0.14 wt.% (среднее 0.13 wt.%). Содержание P_2O_5 изменяется от 0.02 до 0.08 wt.% (среднее 0.05 wt.%). Содержание TiO_2 изменяется от 0.09 до 0.18 wt.% (среднее 0.14 wt.%). Потери при прокаливании составляют 35.90-36.98 wt.% (среднее 36.51 wt.%).

Содержания CaO (41.22 -44.86 wt.%), SiO_2 (9.88 -12.25 wt.%) and Al_2O_3 (1.70 - 2.64 wt.%) указывают на определенную роль осадочного материала из терригенных источников сноса. Железистость известняков позволяет предположить внедрение ионов железа в кальцит во время его первичной кристаллизации в восстановительных условиях.

Изучение ряда связей между элементами позволяет предположить о составе источников сноса для формирования терригенной примеси известняков.

Обнаруживаются положительные связи между SiO_2 (первая переменная) и (MnO , P_2O_5 , K_2O) (вторая переменная), что свидетельствует о терригенном происхождении этих компонентов. Связи между SiO_2 (первая переменная) и (MgO , Na_2O , SO_3) (вторая переменная) позволяют считать, что сера, магний и натрий ассоциированы с обломочным материалом.

Положительные связи CaO (первая переменная) с (Al_2O_3 , MgO , SO_3) (вторая переменная) и отрицательные связи CaO (первая переменная) с (TiO_2 , P_2O_5 , K_2O) (вторая переменная) указывают на хемогенное

карбонатонакопление. Отмечается увеличение содержаний SiO_2 , TiO_2 , P_2O_5 , Fe_2O_3 и K_2O с уменьшением CaO . Это может свидетельствовать том, что SiO_2 привносился в кварцевых зернах.

Отрицательные связи Al_2O_3 (первая переменная) с (Fe_2O_3 , SiO_2) (вторая переменная) и положительные связи Al_2O_3 (первая переменная) с (MgO , Na_2O , SO_3) (вторая переменная) могут указывать на роль фоссилий в формировании карбонатных осадков.

Состав второстепенных элементов (Hg, As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Sr, Se и Zn) имеет свои особенности.

Содержание Hg варьирует от 0.16 до 0.33 ppm, (среднее = 0.25 ppm). Содержание As изменяется от 9.68 до 14.23 ppm (среднее = 12.32 ppm). Содержание Cd составляет 7.31-11.65 ppm (среднее = 8.72 ppm). Содержание Co изменяется от 28 до 41 ppm (среднее = 33 ppm). Содержание Cr - 161 - 188 ppm (среднее = 176.5 ppm). Содержание Cu - 24 - 36 ppm (среднее = 31 ppm). Mn - 869 - 1012 ppm (среднее = 913.50 ppm). Ni - 32 - 43 ppm (среднее = 36.75 ppm). Sr - 221 ppm - 326 ppm (среднее = 270.5 ppm). Se - 2.14 - 2.88 ppm (среднее = 2.47 ppm). Zn - 73 - 93 ppm (среднее = 84.75 ppm).

При сравнении данного элементного состава с составом второстепенных элементов по PAAS устанавливается, что изучаемые известняки характеризуются повышенными содержаниями Hg, Cr, Mn, Se и пониженными содержаниями Cd, Cu, Ni, Sr и Zn.

Mn может быть использован как индикатор стадийности карбонатообразования. Содержание Mn изменяется в интервале 869 - 1012 ppm (среднее = 913.50 ppm). Изменения в концентрациях могут быть обусловлены различиями в скоростях кристаллизации диагенетического кальцита [Rao, 1990].

Список рекомендуемой литературы

Мурзагалиев Д.М. Геодинамика Каспийского региона и ее отражение в геофизических полях//Геология нефти и газа, 1998. – № 2. – С. 10–15.

Юдович Я.Э, Кетрис М.А. Основы литохимии. Санкт-Петербург - «Наука» - 2000. - 480 с.

Bhatia, M.R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. J. Geol. - 1983. – 91.- P. 611-627.

Campos Alvarez, N.O.; Roser, B.P. Geochemistry of black shales from the Lower Cretaceous Paja Formation, Eastern Cordillera, Colombia: source weathering, provenance, and tectonic setting. Journal of South American Earth Sciences.- 2007, 23.- P.271-289.

Condie, K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. Chem. Geol. - 1993. - 104. – P.1—37.

Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. Geochim Cosmochim Acta. - 1995. -59. - P. 2919-2940.

Crook K.A.W. Lithogenesis and geotectonics: The significance of compositional variation in flysch arenites (greywackes), J. Society of Economical, Paleontological and Mineralogical Special Publications. -1974. – 19. - P.304-310.

Dickinson W.R., Beard I.S., Brakenridge G.R., Erjavec J.L., Ferguson R.C., Inman K.F., Knepp R.A., Lindber F.A. and Ryberg P.T. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. Geological Society of America Bulletin. – 1983. - 93. - P. 222-235.

Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology. -1995. – 23. – P. 921-924.

Floyd P.A., Winchester J.A., Park R.G. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, N.W. Scotland: Precambrian Research. – 1989. -45(1-3). – P. 203-214.

Hallberg R.O. A geochemical method for investigation of palaeoredox conditions in sediments: Ambio, Special Report. – 1976. -4. – P. 139-147.

Harnois L. The CIW index; a new chemical index of weathering. Sediment Geol. – 1988. - 55. - P.319-322.

Hayashi K.I., Fujisawa H., Holland H.D., Ohmoto H. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. Geochim Cosmochim Acta. – 1997. -61.- P. 4115-4137.

Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. J. Sediment. Res. – 1988. - 58 (5). - P. 820-829.

Jones B. , Manning D.A.C. Comparison of geological indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. Chemical Geology. - 1994. -111, 111-129.

Kroonenberg S.B. Effects of provenance, sorting and weathering on the geochemistry of fluvial sands from different tectonic and climatic environments. - Proceedings of the 29th International Geological Congress, 1994.

Larsen G., Chilingar G. V. (eds) Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks. - Amsterdam, New York: Elsevier. - 1979. - 579 pp.

Maynard J.B., Valloni R., Yu H.S.. Composition of modern deep sea sands from arc-related basins. In: Leggett, J.K. (Ed.), Trench and forearc Geology: Sedimentation and Tectonics on Modern and Ancient Active Plate Margins. - 1982. - vol. 10. - Geological Society of London, Special. Publications - P. 551-561.

McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Johnsson MJ, Basu A, editors. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Boulder, CO, USA: Geological Society of America Special Paper. – 1993. - P. 21–40.

Nesbitt H.W., Young G.M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. J. Geol. – 1982. -48. - P.1523 - 1534.

Nurgalieva N. G., Khaziev R. R., Gareev B. I. and Batalin G. A. Urzhumian stage in geochemical variations - ARPN JEAS – 2014. – 5. - P.757-764.

Pamela R.R. and Macintyre I.G. Carbonate recrystallization in shallow marine environment: A widespread diagenetic process forming micritised grains. J.Sed.Research. – 1998. – V.68 - No 5-P.928-946.

Pettijohn F.J. Sedimentary Rocks. 3rd ed. New York, NY, USA: Harper and Row. 1975.

Rao V.P. Petrography, trace elements and oxygen and carbon isotopes of Gorden Group carbonates (Ordovician), Florentine Valley, Tasmania, Australia, Sed. Geol. - 1990. - V.66. -P.83-97.

Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. J.Geol. – 1986. - vol. 94, no. 5. -P. 635–650.

Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signatures of sandstone mudstone suites determined using discrimination function analysis of major element data. Chem Geol. – 1988. - 67.- P. 119–139.

Suttner L.J., Dutta P.K. Alluvial sandstone composition and paleoclimate, I. Framework mineralogy. J Sediment Petrol. – 1986. – 56. -P. 329–345.

Taylor S.R. and McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, London. – 1985. - 312 p.